

ГЕОЛОГІЧНІ НАУКИ

УДК 330.322.2:622.323

ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ТА ОЦІНЮВАННЯ ПЕРСПЕКТИВ ВИДОБУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ІЗ СЛАНЦЕВИХ ПОРІД

Лебега О.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Проведено аналіз ресурсів сланцевого газу у окремих країнах, де на даний час здійснена оцінка цього енергетичного ресурсу. Встановлено, що за різними оцінками ресурси сланцевого газу перевищують ресурси традиційного газу. На основі проведеного аналізу існуючих оцінок ресурсів сланцевого газу встановлено, що вони перевищують ресурси традиційного газу. Обґрунтовано критерії для виділення найбільш перспективних зон щодо можливостей комерційного видобутку газу із сланцевих формацій. Проведено кореляційно-регресійний аналіз з використанням таких характеристик сланцевих формацій як: вміст органічної речовини, ступінь її катагенезу, інтервали глибин залягання сланцевих порід, ефективна товщина, пористість, проникливість, вміст газу. Встановлено кореляційно-регресійні залежності між цими параметрами і продуктивністю газовидобувних свердловин. Статистичні дані, на основі яких отримані кореляційні залежності, зібрані шляхом аналізу інформації про досвід видобування сланцевого газу у таких країнах, як США – плеї Marcellus, Haynesville, Barnett, Fayetteville, Woodford, Antrim, New Albany, Канада – плеї Montenev, Horn River, Китай – плеї Fuling та Аргентина – плеї Vaca Muerta.

Ключові слова: сланцевий газ, ресурси, характеристики сланцевих формацій, критерії, перспективні зони, природний газ із сланцевих порід, характеристики сланцевих формацій, кореляційно-регресійні залежності, оцінка продуктивності газових свердловин у сланцевих формаціях.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку світової економіки для оцінки та прогнозування економічних процесів широко застосовують математичні методи. Значна кількість, мінливість та невизначеність факторів у нафтогазовидобувній сфері обумовлює необхідність застосування множинного кореляційно-регресійного аналізу для кількісної оцінки залежностей між параметрами, що характеризують окремі геолого-фізичні властивості нафтогазоперспективних формацій та економічними характеристиками видобування із них вуглеводнів. Під час такого аналізу необхідно встановити теоретичну форму зв'язку між факторними і результативними ознаками (регресійний аналіз) та визначити тісноту цього зв'язку (кореляційний аналіз), тобто кількісно виміряти й оцінити механізм взаємодії досліджуваних факторних ознак. Отримані результати кореляційно-регресійного аналізу можна використати для економічного обґрунтування управлінських рішень в процесі розвідки та видобутку природного газу із сланцевих порід на нових перспективних ділянках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам виявлення найбільш перспективних зон щодо рентабельного видобутку природного газу із сланцевих порід присвячено ряд публікацій [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Однак, у цих роботах здебільшого розглядалися проблеми встановлення критеріїв, які якісно і кількісно характеризують найбільш перспективні зони у сланцевих формаціях та обґрунтування раціонального комплексу геолого-геофізичних методів, що дають можливість їх виявляти та оцінювати.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проведений аналіз показав,

що у вищезазначених роботах не було спроб застосування кореляційно-регресійного аналізу з метою подальшого використання отриманих кореляційних залежностей для прогнозування економічних характеристик родовищ природного газу у сланцевих формаціях. Існуючий досвід видобування газу із сланцевих порід [13, с. 40-52] дав змогу встановити найважливіші характеристики сланцевих формацій, які і послужили основою для кореляційно-регресійного аналізу.

Мета статті. Метою цієї роботи є встановлення кореляційно-регресійних залежностей та встановлення можливостей їх використання для оцінки продуктивності газовидобувних свердловин у сланцевих формаціях на нових територіях, площах і локальних об'єктах.

Виклад основного матеріалу. На даний час, і у найближчій перспективі, природний газ залишатиметься основним і найбільш екологічним джерелом енергії для людства. При цьому, невід'ємною і все важливішою складовою у світовому балансі видобутку природного газу стає сланцевий газ. Останніми роками у США відбулася так звана сланцева революція, яка спричинила ресурсну регіоналізацію в енергозабезпеченні, значну активізацію інноваційно-інвестиційної діяльності у багатьох регіонах США і дала змогу цій країні вийти на перше місце у світі за обсягами видобування природного газу.

Основними центрами трансферу інноваційних технологій при видобуванні сланцевого газу є США, Канада, Китай, Аргентина та Європа. Це пов'язано із найбільшими обсягами споживання природного газу і потенційними ресурсами сланцевого газу у цих країнах та регіонах.

Загалом, видобувні ресурси сланцевого газу в світі оцінюються у 214,57 трлн м³. Розподіл ре-

сурсів сланцевого газу у окремих регіонах і країнах світу подано у табл. 1.

Таблиця 1
Технічно видобувні запаси газу із сланців за даними EIA, ARI на січень 2014 р. і на вересень 2015 р. [EIA, 2014, 2015]

2014 р.	Країни	Газ, трлн. м ³	2015 р.	Країни	Газ, трлн. м ³
1	Китай	31,58	1	Китай	31,58
2	Аргентина	22,71	2	Аргентина	22,70
3	Алжир	20,21	3	Алжир	20,02
4	США	18,83	4	США	17,63
5	Канада	16,23	5	Канада	16,22
6	Мексика	15,43	6	Мексика	15,44
7	Австралія	12,38	7	Австралія	12,16
8	Південна Африка	11,04	8	Південна Африка	11,04
9	Росія	8,07	9	Росія	8,06
10	Бразилія	6,94	10	Бразилія	6,94
Загальносвітові		206,71	Загальносвітові		214,57

Джерело [16]

Необхідно зазначити, що сланці є найбільш розповсюдженою осадовою породою на Землі. Збагачені у тій чи іншій степені органічною речовиною, вони називаються бітумінозними глинами, аргілітами або чорними сланцями [17, с. 19–22]. За твердженнями багатьох експертів сланцевий газ є стратегічним резервом і стане основним джерелом енергії, після того як у близькому майбутньому будуть вичерпані запаси дешевого конвенційного газу. Наявність ресурсів сланцевого газу практично по всій території земної кулі дасть змогу забезпечувати цим енергетичним ресурсом віддалені і депресивні регіони.

Отже, зважаючи на переваги та перспективи видобування сланцевого газу доцільно розробити інструментарій для виявлення і економічного оцінювання найбільш перспективних зон сланцевих формацій.

Саме з цією метою і застосовано кореляційно-регресійний аналіз. Статистичні дані, на основі яких отримані кореляційні залежності, зібрані шляхом аналізу інформації про досвід видобування сланцевого газу у таких країнах, як США – плеї Marcellus, Haynesville, Barnett, Fayetteville, Woodford, Antrim, New Albany, плеї Канада – Montoney, Horn River), Китай – плеї Fuling та Аргентина – плеї Vaca Muerta [13, с. 40–52]. На цій основі встановлено найважливіші характеристики сланцевих формацій, а саме:

- вміст органічної речовини (керогену), %;
- термальна зрілість сланцевих порід (ступінь катагенезу R^o), %;
- пористість, %;
- ефективна потужність продуктивного горизонту, м;
- проникливість, нанодарсі;
- глибина залягання, м;
- вміст газу, м³/т.

Це стало основою для побудови кореляційних залежностей, за допомогою яких можна отримати кількісну оцінку найбільш перспективних зон для видобування сланцевого газу та визначити

найважливіші економічні параметри таких зон, у першу чергу, продуктивність (дебіт) газових свердловин.

На першому етапі було проведено дослідження статистичних характеристик обраних параметрів [14, с. 63–74]. Встановлено характер їх розподілу, межі змін, математичне очікування, стандартне відхилення.

Далі здійснено кореляційно-регресійний аналіз парних залежностей між характеристиками сланцевих формацій і дебітом газових свердловин.

Вміст органічної речовини у сланцевих породах (рис. 1). Головним критерієм відмінності газозносних сланців від звичайних осадових порід, є вміст органічної речовини (керогену). Вміст органічної речовини у сланцевих товщах розподілений по нормальному закону і змінюється у межах від 0,46% до 20%, середнє значення становить – 4,88%, стандартне відхилення складає 4,04% [14]. Як показують численні дослідження, вміст органічної речовини у перспективних зонах має перевищувати 1–3% [8]. Підвищений вміст органічної речовини також сприяє поновленню запасів газу.

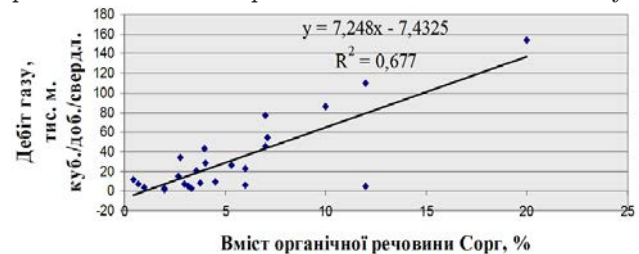


Рис. 1. Залежність між дебітом свердловини Q_g та вмістом органічної речовини S_{org}

Як видно з рисунка 1 залежність між дебітом свердловини Q_g та вмістом органічної речовини S_{org} є прямою і характеризується достатньо високою тісністю зв'язку (коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,68$).

Ступінь катагенезу органічної речовини (рис. 2). Ступінь катагенетичних перетворень органічної речовини визначається за відбитвою здатністю вітриніту (R_o). Загалом, із підвищенням рівня катагенетичних перетворень, тобто рівня термічної зрілості органічної речовини, зростає вміст вуглецю у керогені, відповідно зростає значення R_o . При значних глибинах залягання і в умовах високого тиску, це забезпечує значні початкові дебїти газу. Величина R_o розподілена за нормальним законом, змінюється у межах від 0,4% до 5%, середнє значення становить – 1,88%, стандартне відхилення – 1,09%.

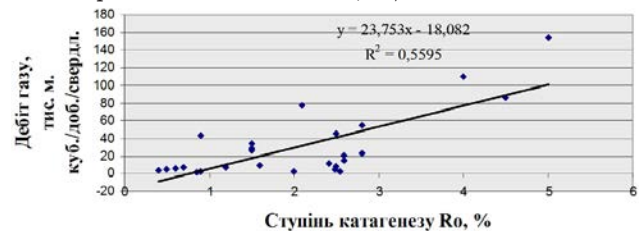


Рис. 2. Залежність між дебітом свердловини Q_g та ступенем катагенезу керогену R^o

Пористість (рис. 3). Локальні високопродуктивні зони сланцевих товщ характеризуються високою матричною пористістю.

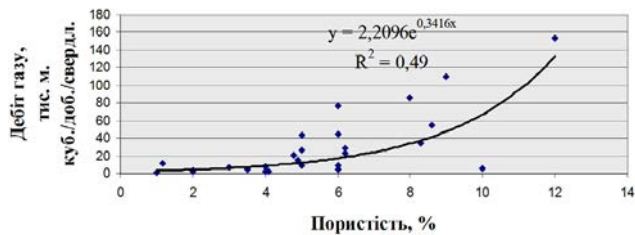


Рис. 3. Залежність між дебітом свердловини Q_g та пористістю сланцевих порід K_p

Пори у сланцевих породах містять значну кількість вільного сланцевого газу, який у початкові періоди видобування можна вилучати з високими дебітами, що сприяє покращенню економічних показників розробки. Пористість сланцевих товщ змінюється у межах від 0,5 до 14%, середнє значення становить – 6,39%, стандартне відхилення складає – 3,73%. Як видно із рис. 3, залежність між пористістю і дебітом має нелінійний характер і описується експоненціальною функцією.

Ефективна потужність сланцевої товщі (рис. 4). Товщина сланців, разом із великою площею їх розповсюдження і наявністю органічної речовини для адсорбції газу визначають запаси сланцевого газу, а також створюють більш сприятливі умови для буріння горизонтальної частини свердловин. Проведений аналіз показав, що ефективна товщина сланцевих товщ змінюється за нормальним законом у межах від 6 м до 350 м, середнє значення становить – 85,8 м, стандартне відхилення складає 76,8 м.

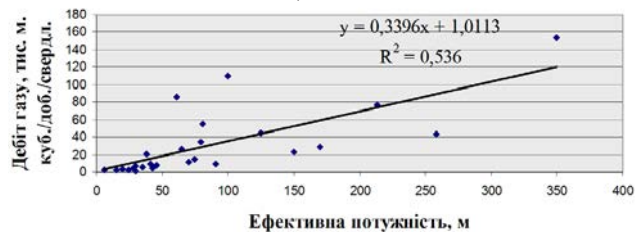


Рис. 4. Залежність між дебітом свердловини Q_g та ефективною товщиною сланцевих порід h_{ef}

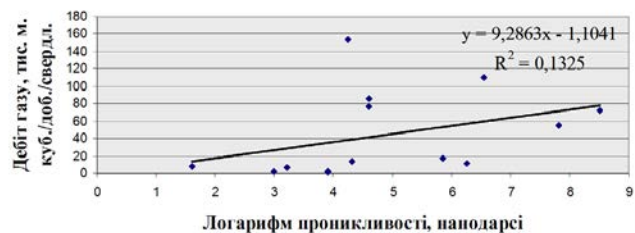


Рис. 5. Залежність між дебітом свердловини Q_g та логарифмом проникливості сланцевих порід $\ln K_{pr}$

Проникливість сланцевих порід (рис. 5). Проникливість є характеристикою, що визначає фільтраційні властивості сланцевих порід. Важливе значення має обумовлена сланцюватістю наявність системи природних тріщин, що визначають проникність і підвищують ефективність проведення ГРП, оскільки існування природних тріщин сприяє розповсюдженню і розвитку систем штучних тріщин. Проникливість сланцевих порід розподілена по логнормальному закону, зміню-

ється у широких межах від 5 до 5000 нанодарсі, середнє значення становить 679 нанодарсі, стандартне відхилення складає 1399 нанодарсі.

Глибина залягання сланцевої товщі (рис. 6). Глибина залягання сланцевої товщі, як геологічний фактор суттєво впливає на вибір технічних, технологічних і організаційних рішень при бурінні свердловин, розробці родовищ, а також є важливим фактором формування величини інвестиційних витрат і собівартості видобутку газу. З іншого боку, із зростанням глибини залягання сланцевих товщ зростають пластові тиски і температури, що сприяє поглибленню ступеня катагенезу органічної речовини та збільшенню продуктивності свердловин. Глибина залягання сланцевих товщ змінюється у межах від 122 до 4378 м, середнє значення становить – 2088 м, стандартне відхилення становить 1131 м. Характер цієї залежності теж нелінійний.

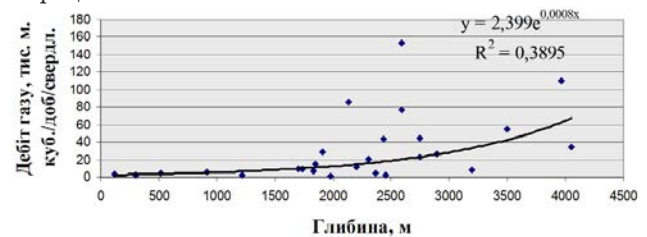


Рис. 6. Залежність між дебітом свердловини Q_g та глибиною залягання сланцевих порід H

Вміст газу (рис. 7). Проведений аналіз вмісту газу у сланцевих товщах світу показав, що він розподілений за нормальним законом і змінюється у межах від 0,44 до 9,9 м³/т, середнє значення становить – 4,58 м³/т, стандартне відхилення – 2,88 м³/т.

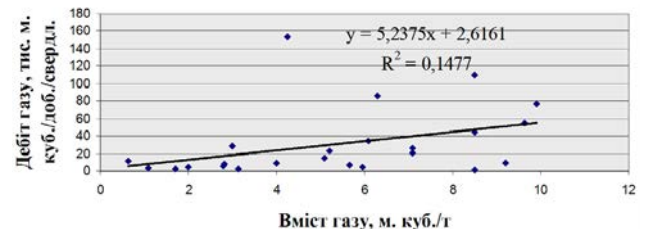


Рис. 7. Залежність між дебітом свердловини Q_g та вмістом газу V_g

Як видно із наведених результатів КРА, всі отримані парні кореляційно-регресійні залежності є значимими і підтверджують геолого-фізичну сутність взаємозв'язків між досліджуваними параметрами.

Відомо, що більш точно і достовірно встановити зв'язки між досліджуваними параметрами дає змогу застосування багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу [1, 2]. Саме це завдання було наступним етапом дослідження, в результаті якого отримано такі залежності між дебітом газу із свердловин у сланцевих породах і найважливішими геологічними характеристиками цих порід (1, 2):

$$Q_g = -34,54 + 3,74 C_{org} + 9,06 R_o + 0,4 K_p + 0,14 h_{ef} + 0,006 H \quad (1)$$

$R_m = 0,94$; Обсяг вибірки – 26 спостереження; $F_p = 28,64 > F_{кр} = 2,01$.

$$Qr = -29,35 + 3,44 \text{ Corp} + 4,38 \text{ Kп} + 0,17 \text{ heф} + 1,95 \text{ In Kпр} \quad (2)$$

$R_m = 0,91$; Обсяг вибірки – 14 спостережень;
 $F_p = 11,26 > F_{кр} = 3,34$.

Отримані залежності характеризуються високою тісністю зв'язку, що підтверджується коефіцієнтами множинної кореляції $R_m = 0,91-0,94$ та значним перевищення критичних значень критерію Фішера.

Необхідно зазначити, що отримані залежності мають важливе практичне значення, так як дозволяють прогнозувати найважливіший геолого-економічний показник сланцевих порід – прогнозний дебіт газових свердловин. Окрім того, ці залежності дають змогу оцінити якість буріння та розкриття сланцевих порід через співставлення між прогнозним та фактичними дебітами свердловин.

На останньому етапі дослідження встановлено кореляційну залежність ціни беззбитковості видобування сланцевого газу від початкового дебіту свердловин (рис. 8), на основі даних по основних родовищах США (Барнетт, Фаєтвілл, Хейнсвілл, Марселлус, Вудфорд), які наведені у роботі [15, с. 53].

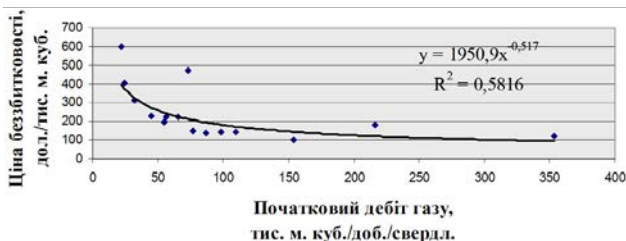


Рис. 8. Залежність беззбитковості видобутку сланцевого газу від дебіту свердловин

Як видно із рис. 8, залежність має нелінійний характер, і добре описується степеневу

функцією. Ця залежність дає змогу прогнозувати граничну межу продуктивності свердловин, при якій видобування сланцевого газу може бути беззбитковим.

Висновки і пропозиції. В результаті проведених досліджень:

1. Отримані парні кореляційні залежності між продуктивністю сланцевих свердловин і вмістом органічної речовини, ступенем її катагенетичних перетворень, пористістю сланцевих порід, ефективною потужністю; проникливістю, глибиною залягання, вмістом газу;

2. Встановлені багатомірні кореляційно-регресійні залежності між продуктивністю сланцевих свердловин та найважливішими геологічними характеристиками сланцевих формацій;

3. Встановлена кореляційна залежність між продуктивністю сланцевих свердловин і граничною межею витрат, при яких можливий беззбитковий видобуток сланцевого газу.

Отримані залежності дають можливість здійснювати прогнозування продуктивності свердловин та граничної межі беззбиткового видобування сланцевого газу на будь-яких ділянках сланцевих родовищ, що є основою для успішного управління процесами проведення геологорозвідувальних робіт та розробки сланцевих родовищ. Використання цих кореляційно-регресійних залежностей також може стати поштовхом для переоцінки перспективності видобування природного газу із сланцевих відкладів у різних осадових басейнах світу, у тому числі, і України.

Подальші дослідження будуть спрямовані на уточнення і вдосконалення, кореляційно-регресійних залежностей, по мірі отримання додаткової інформації про геолого-економічні характеристики сланцевих порід у нових перспективних регіонах та родовищах сланцевого газу.

Список літератури:

1. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ, 3-е издание / Н. Дрейпер, Г. Смит; перевод с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. – 912 с.
2. Мур Д. Экономическое моделирование в Microsoft Excel, 6-е издание / Д. Мур, Д. Р. Уэдерфорд, Г. Эллен, Ф. Гулд, Ч. Шмидт; перевод с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1024 с.
3. Дмитриевский А. Н. Сланцевый газ – новый вектор развития мирового рынка углеводородного сырья / А. Н. Дмитриевский, В. И. Высоцкий // Газовая промышленность. – 2010. – № 8. – С. 44-47.
4. Сорокин С. Н. Основные проблемы и перспективы добычи сланцевого газа / С. Н. Сорокин, А. А. Горячев – М.: 2012 [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://www.eriras.ru/files/Sorokin_Goryachev_OEPEE_slanec.pdf
5. Цветков Л. Д. Сланцевые углеводороды (библиографический обзор) / Л. Д. Цветков, Н. Л. Цветкова [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://ftp.nedra.ru/rus/activity/archive/publications/hydrocarbons.pdf>
6. Юрова М. П. Особенности разработки сланцевых углеводородов США (на примере формаций Бакен, Игл Форд, Барнетт, Хайнесвилл, Фаєтвілл, Марселлус) / М. П. Юрова // [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://geors.ru/media/pdf/07_Yurova.pdf
7. Бойер Ч. Сланцевый газ – глобальный ресурс / Ч. Бойер, Б. Кларк, Р. Льюис, К. К. Миллер // Нефтегазовое обозрение. – 2011, том 23, № 3 – С. 36-51. ©Copyright 2012 Schlumberger.
8. Поиск высокопродуктивных зон: качество коллектора и качество заканчивания скважин / Нефтегазовое обозрение, 2013-2014. – [Электронный ресурс] // Режим доступа: www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/russia13/win13/article.5.pdf
9. Богоявленский В. И. Месторождение Марселлус – лидер сланцевой революции в США / В. Богоявленский, П. Баринов, И. Богоявленский, К. Якубсон // [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://burneft.ru/archive/issues/2016-12/16>
10. Лян С. Сравнительный анализ условий формирования и нефтегазоносности доманиковых отложений юго-востока Русской платформы и сланцевых пород нижнего палеозоя Сычуаньской депрессии платформы Янцзы Китая: дис. канд. геол.-мин. наук: 25.00.12 / С. Лян. – Москва, 2016. – 154 с. – [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.gubkin.ru/diss2/files/Dissertation_LIANG_X.pdf
11. San Leon Energy задоволена результатом гідророзриву в Польщі / [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://shalegas.in.ua/san-leon-energy-zadovolena-rezultatom/>.

12. Собко А. Сланцевая революция в мире: как не запутаться в цифрах / А. Собко [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.odnako.org/blogs/slancevaaya-revoluciya-v-mire-kak-ne-zaputatsya-v-cifrah/>
13. Витвицкий Я. С. Світовий досвід видобування сланцевого газу / Я. С. Витвицкий, О. В. Лебега // Науковий вісник ІФНТУНГ: серія «Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості». – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, № 1(13), 2016. – С. 40-52.
14. Витвицкий Я. С. Врахування фактора часу при освоєнні родовищ природного газу у сланцевих породах / Я. С. Витвицкий, О. В. Лебега // «Вісник ВІЕМ», № 18, 2017. – С. 63-74.
15. Нетрадиционный газ как фактор регионализации газовых рынков [А. М. Мастепанов, А. Д. Степанов, С. В. Горевалов, А. М. Белогорьев]; под общ. ред. д.э.н. А. М. Мастепанова и к.г.н., доц. А. И. Громова – М.: ИЦ «Энергия», 2013. – 128 с.
16. World Shale Resource Assessments / EIA, 2015. [Электронный ресурс]. // Режим доступа: URL: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>.
17. Лукин А. Е. Сланцевый газ и перспективы его добычи в Украине / А. Е. Лукин // Геологический журнал. – 2010. – № 3. – С. 17-33.

Лебега О.В.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ЕКОНОМІЧЕСЬКА ЦЕЛЕСОБРАЗНОСТЬ І ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВ ДОБЫЧІ ПРИРОДНОГО ГАЗА ІЗ СЛАНЦЕВИХ ПОРОД

Аннотация

Проведен анализ ресурсов сланцевого газа в отдельных странах, где в настоящее время осуществляется оценка этого энергетического ресурса. Установлено, что по разным оценкам ресурсы сланцевого газа превышают ресурсы традиционного газа. На основе анализа существующих оценок ресурсов сланцевого газа обоснованы критерии для выделения наиболее перспективных зон для коммерческой добычи газа из сланцевых формаций. Приведены результаты корреляционно-регрессионного анализа с использованием таких характеристик сланцевых формаций как: содержание органического вещества, степень его катагенеза, интервалы глубин залегания сланцевых пород, эффективная толщина, пористость, проницаемость, содержание газа. Установлены корреляционно-регрессионные зависимости между этими параметрами и производительностью скважин для добычи сланцевого газа. Статистические данные, на основе которых получены корреляционные зависимости, собраны путем анализа информации об опыте добычи сланцевого газа в таких странах, как США – плеи Marcellus, Haynesville, Barnett, Fayetteville, Woodford, Antrim, New Albany, Канада – плеи Montenevy, Horn River, Китай – плеи Fuling и Аргентина – плеи Vaca Muerta.

Ключевые слова: сланцевый газ, ресурсы, характеристики сланцевых формаций, критерии, перспективные зоны, газ из сланцевых пород, характеристики сланцевых формаций, корреляционно-регрессионные зависимости, оценка производительности газовых скважин в сланцевых формациях.

Lebega O.V.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ECONOMIC PERFORMANCE AND EVALUATION PROSPECTS OF NATURAL GAS EXTRACTION FROM SHALE ROCK

Summary

An analysis of the shale gas resources in some countries, where an assessment of this energy resource is currently being carried out. It has been established that, according to various estimates, the resources of shale gas exceed the resources of traditional gas. Based on the analysis, criteria have been established for the most promising areas regarding the possibility and prospects of commercial gas extraction from shale formations in the oil and gas basins of the world. Characteristics of shale formations are investigated for each of these deposits: gas content, depth intervals of shale rock formation, effective thickness, porosity, penetrability, organic matter content, catagenesis, wells productivity. The article results of correlation-regression analysis are presented in order to further use the obtained correlation dependences for the estimation of economic parameters of natural gas extraction from shale breeds. The article uses a correlation-regression analysis to further use the obtained correlation dependencies to assess the prospects for the extraction of natural gas from slate rocks in any region of the world. The statistical data on which correlation dependencies are derived are collected by analyzing information on the experience of shale gas extraction in countries such as the United States Marcellus, Haynesville, Barnett, Fayetteville, Woodford, Antrim, New Albany, Canada, Montenegro, Horn River), China – play Fuling and Argentina – the playground Vaca Muerta.

Keywords: shale gas, resources, characteristics of shale formations, criteria, prospective zones, natural gas from slate rocks, characteristics of shale formations, correlation-regressive dependencies, estimation of productivity of gas wells in slate formations.